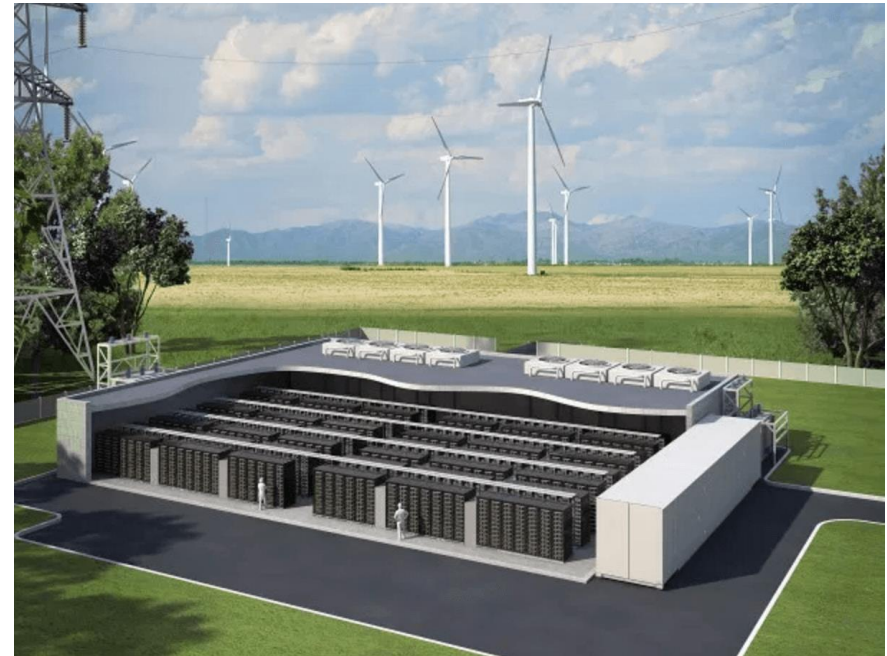


# Εισαγωγή στην Ενεργειακή Τεχνολογία

1<sup>ο</sup> και 5<sup>ο</sup> εξάμηνο Σχολής Πολιτικών Μηχανικών

## Αποθήκευση ηλεκτρικής ενέργειας – Υβριδικά συστήματα



Ανδρέας Ευστρατιάδης & Νίκος Μαμάσης

Τομέας Υδατικών Πόρων & Περιβάλλοντος, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο

Ακαδημαϊκό έτος 2021-22

# Αποθήκευση ηλεκτρικής ενέργειας στο παραδοσιακό και σύγχρονο μοντέλο παραγωγής-διανομής-κατανάλωσης

---

- **Παραδοσιακό μοντέλο ηλεκτρικής ενέργειας:**
  - Συγκεντρωτικό σύστημα καθετοποιημένης παραγωγής-διανομής (λίγες μονάδες, μεγάλης ισχύος, κεντρικά ελεγχόμενες)
  - Μονάδες βάσης, αργής απόκρισης (π.χ. θερμοηλεκτρικοί σταθμοί), και μονάδες αιχμής, γρήγορης απόκρισης (π.χ. μεγάλα υδροηλεκτρικά έργα)
  - Παρακολούθηση φορτίου με πρόσθεση ή αφαίρεση μονάδων παραγωγής
  - Οικονομικά κίνητρα στους καταναλωτές για χρονική εξομάλυνση των ενεργειακών χρήσεων (νυχτερινά και βιομηχανικά τιμολόγια)
  - Απόρριψη πλεονάζουσας ενέργειας ή πώλησή της (εξαγωγή) σε πολύ χαμηλή τιμή
- **Σύγχρονο μοντέλο ηλεκτρικής ενέργειας:**
  - Αποκεντρωτικό σύστημα (πολλές μονάδες κάθε ισχύος, χωρικά διασπαρμένες)
  - Αυξανόμενη διείσδυση ΑΠΕ, μη ελεγχόμενη παραγωγή
  - Σταδιακή απόσυρση συμβατικών μονάδων
  - Αυτόνομα υβριδικά συστήματα μικρής κλίμακας (π.χ. νησιά)
  - Αυτονομία ακόμα και σε επίπεδο νοικοκυριού (net metering)
  - Έντονα ανταγωνιστικό οικονομικό περιβάλλον

# Απαιτήσεις συστημάτων αποθήκευσης ενέργειας

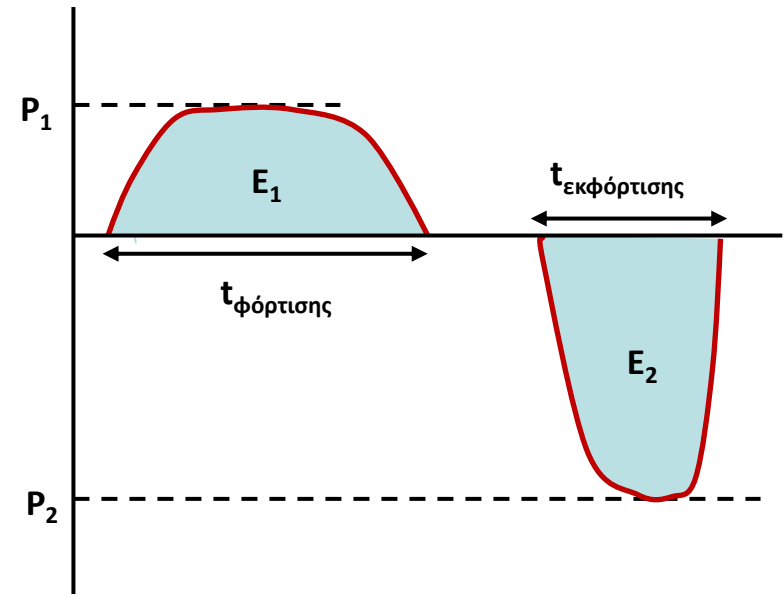
## □ Γενικές απαιτήσεις:

- Αμελητέα αποθηκευτικότητα ηλεκτρικού δικτύου → απαίτηση άμεσης απορρόφησης της παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας από την κατανάλωση
- Βελτίωση ποιότητας παρεχόμενου ηλεκτρικού ρεύματος → ελαχιστοποίηση διακυμάνσεων τάσης στο δίκτυο μεταφοράς και διανομής
- Απαιτήσεις σε ασφάλεια → μονάδες ταχείας εφεδρείας για άμεση εξυπηρέτηση της κατανάλωσης στην περίπτωση διακοπής λειτουργίας βασικών μονάδων

## □ Αποθήκευση → απώλειες ενέργειας κατά τη μετατροπή και την αυτοεκφόρτιση

## □ Γενικές αρχές σχεδιασμού και λειτουργίας:

- «Φόρτιση» σε περιόδους χαμηλής ζήτησης και απόδοση ενέργειας για κάλυψη αιχμών ζήτησης
- Εφαρμογή μίγματος τεχνολογιών με διαφορετικά χαρακτηριστικά (χρόνος απόκρισης, μέγιστο βάθος εκφόρτισης, χρόνοι φόρτισης-εκφόρτισης)
- Καθοριστικός παράγοντας η χρονική κλίμακα της ενεργειακής αποθήκευσης (βραχυπρόθεσμη/μακροπρόθεσμη)



# Βραχυπρόθεσμη αποθήκευση ενέργειας

---

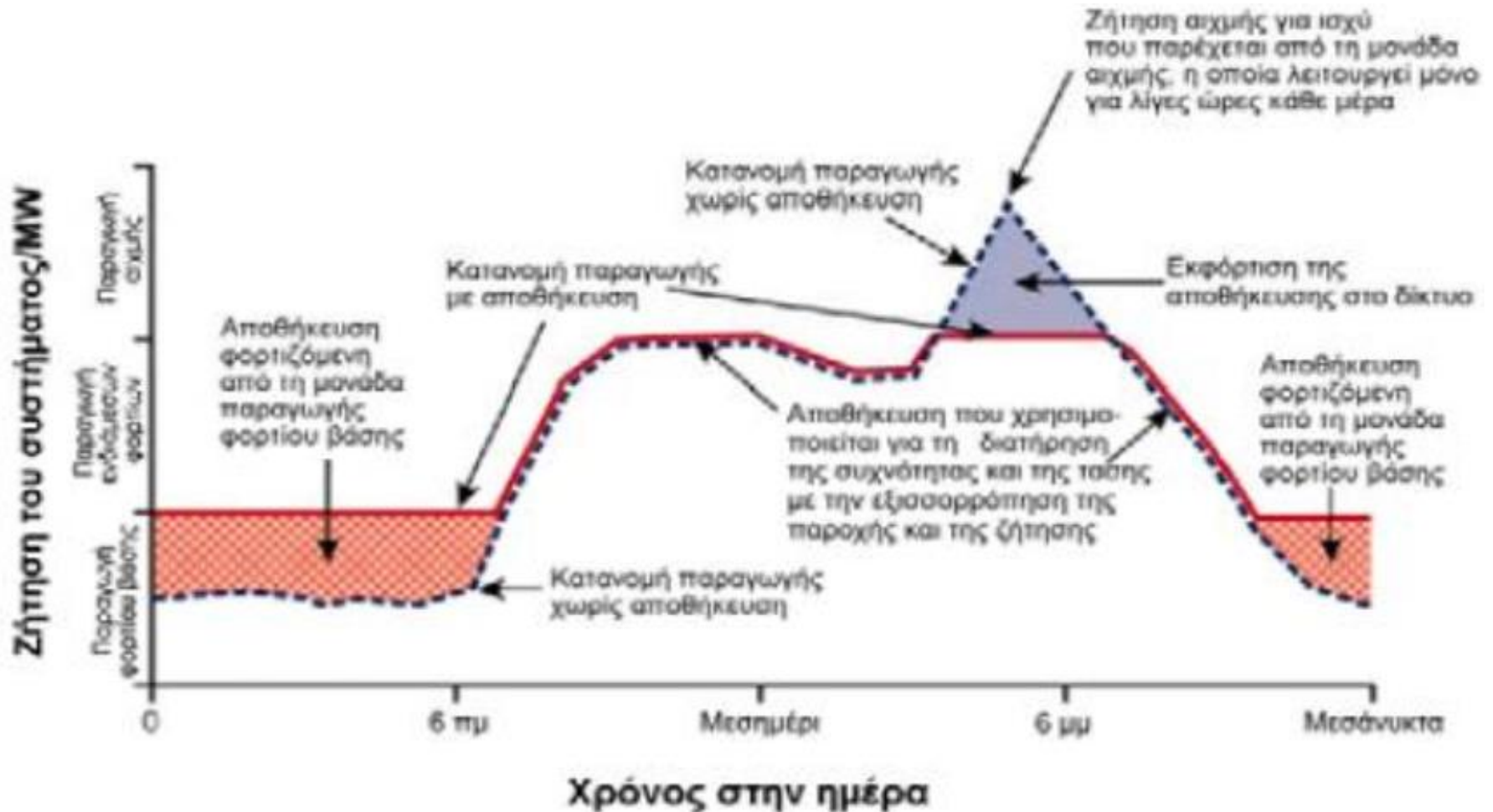
- ❑ Χρησιμοποιούνται σε **κατανεμημένες εφαρμογές ηλεκτροπαραγωγής** (όταν δηλαδή η παραγωγή λαμβάνει χώρα κοντά ή στην ίδια τη θέση της ζήτησης) και έχουν την ικανότητα να ανταποκρίνονται στα αιτήματα για μικρά χρονικά διαστήματα.
- ❑ Εφαρμόζονται για να βελτιώσουν την **ποιότητα ισχύος** στα ηλεκτρικά συστήματα και συγκεκριμένα για να διατηρήσουν σταθερή την τάση κατά την ενεργειακή συνεισφορά, σε περιπτώσεις βυθίσεων ή κυματισμών που διαρκούν για **λίγα δευτερόλεπτα ή λεπτά**.
- ❑ **Τυπικές διατάξεις:**
  - ❑ Σφόνδυλοι (flywheels)
    - ❑ Περιστρεφόμενος συμπαγής δίσκος προσαρμοσμένος σε άξονα περιστροφής, που τοποθετείται σε θάλαμο κενού για ελαχιστοποίηση των τριβών
    - ❑ Αποθήκευση ενέργειας εξαρτώμενη από την περιστροφική ταχύτητα και τη ροπή αδράνειας του σφονδύλου (υψηλές απαιτήσεις σε αντοχή υλικού)
    - ❑ Απόδοση ενέργειας με χρήση της ροπής του περιστρεφόμενου σφονδύλου
    - ❑ Βαθμός απόδοσης 80-90%, απώλειες αυτοεκφόρτισης έως και 15% την ώρα
  - ❑ Υπερπυκνωτές (supercapacitors) → αποθήκευση σε μορφή ηλεκτροστατικού πεδίου, λόγω διαφορετικού ηλεκτρικού φορτίου στους οπλισμούς
  - ❑ Υπεραγώγιμα μαγνητικά συστήματα ενεργειακής αποθήκευσης (superconducting magnetic energy storage, SMES) → αποθήκευση σε μορφή μαγνητικού πεδίου

# Μακροπρόθεσμη αποθήκευση ενέργειας

---

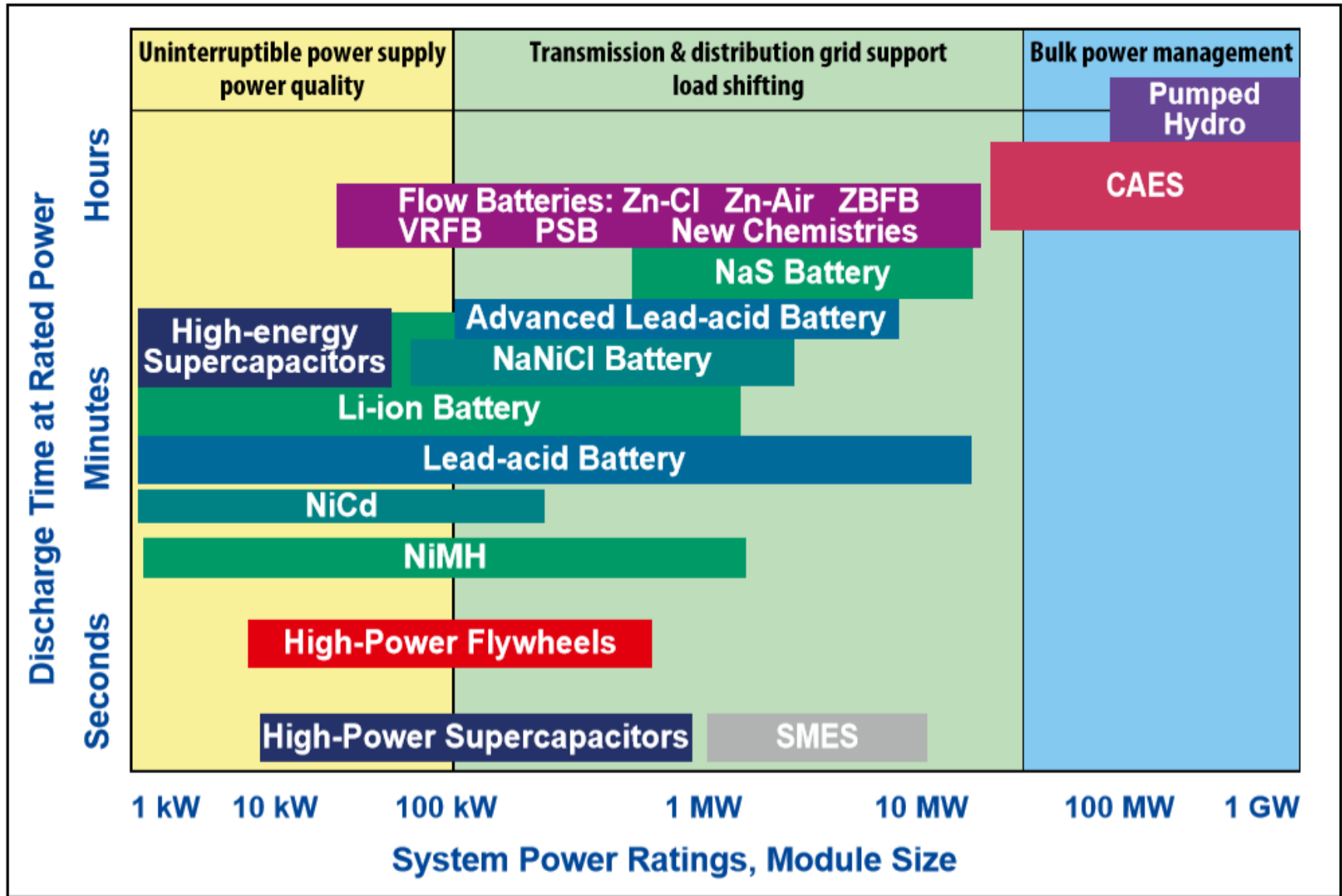
- ❑ Μεγάλες κεντρικές εγκαταστάσεις που έχουν την ικανότητα να αποθηκεύουν και να παρέχουν την ηλεκτρική ενέργεια για **μεγάλες χρονικές περιόδους**.
- ❑ Μπορούν να αποθηκεύουν και να παρέχουν την ηλεκτρική ενέργεια κατά τη διάρκεια ωρών ή ημερών, συμβάλλοντας στη διαχείριση της πλεονάζουσας ενέργειας, τη ρύθμιση της συχνότητας και τη διαχείριση της συμφόρησης στο δίκτυο.
- ❑ **Τυπικές διατάξεις:**
  - ❑ Αντλησιοταμίευση (pumped-storage)
  - ❑ Συσσωρευτές – μπαταρίες (ροής, μετάλλου-αέρος, ιόντων, λιθίου, μολύβδου-οξέος, λιθίου-θείου, οξειδοαναγωγής, κτλ.)
  - ❑ Αποθήκευση συμπιεσμένου αέρα (compressed air energy storage, CAES)
  - ❑ Αποθήκευση υγροποιημένου αέρα (liquid air energy storage, LAES)
  - ❑ Αποθήκευση υδρογόνου (fuel cells – hydrogen energy storage)
  - ❑ Αποθήκευση θερμότητας σε τήγμα άλατος
- ❑ **Άλλες μορφές αξιοποίησης πλεονάζουσας ενέργειας (χωρίς παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας στο δίκτυο):**
  - ❑ Αφαλάτωση → αποθήκευση πόσιμου νερού
  - ❑ Αποθήκευση θερμότητας → αποθήκευση ζεστού νερού
  - ❑ Φόρτιση ηλεκτρικών οχημάτων

# Σχηματικό διάγραμμα μακροπρόθεσμης αποθήκευσης ενέργειας σε κλίμακα 24ώρου



Πηγή: Σταυρακάκης, Γ., *Συστήματα αποθήκευσης ενέργειας*, Πρόγραμμα επικαιροποίησης γνώσεων αποφοίτων «Φωτοβολταϊκά ενεργειακά συστήματα», Ενότητα 3.1, Τμήμα Ηλεκτρολόγων Μηχανικών ΤΕΙ Κρήτης & Τμήμα Χημείας Πανεπιστημίου Κρήτης

# Εφαρμογές τεχνολογιών αποθήκευσης ενέργειας



# Συγκριτικός πίνακας

	supercap	SMES	flywheel	lead-acid	lithium-ion	NaS	redox-flow	hydrogen	pumped hydro	CAES
energy density in Wh/l	2-10	0,5-10	80-200	50-100	200-350	150-250	20-70	750/250bar 2400/liquid	0,27-1,5	3-6
installation costs in €/kW	150-200	high	300	150-200	150-200	150-200	1000-1500	1500-2000	500-1000	700-1000
installation costs in €/kWh	10000-20000	high	1000	100-250	300-800	500-700	300-500	0,3-0,6	5-20	40-80
reaction time	<10ms	1-10ms	>10ms	3-5ms	3-5ms	3-5ms	>1s	10min	>3min	3-10min
self-discharge rate	up to 25% in first 48h	10-15 %/day	5-15 %/h	0,1-0,4 %/day	5 %/month	10 %/day	0,1-0,4 %/day	0,003-0,03 %/day	0,005-0,02 %/day	0,5-1 %/day
cycle life-time	>1Mill.	>1Mill.	>1Mill.	500-2000	2000-7000	5000-10000	>10000	>5000		
life-time in years	15	20	15	5-15	5-20	15-20	10-15	20	80	ca. 25
system efficiency in %	77-83	80-90	80-95	70-75	80-85	68-75	70-80	34-40	75-82	60-70
short-term (<1min)	XXX	XXX	XXX		X		X			
mid-term (>1min,<2d)			X	XXX	XXX	XX	XX	X	XX	XX
long-term (>2d)				X		X	XX	XXX	XXX	XX



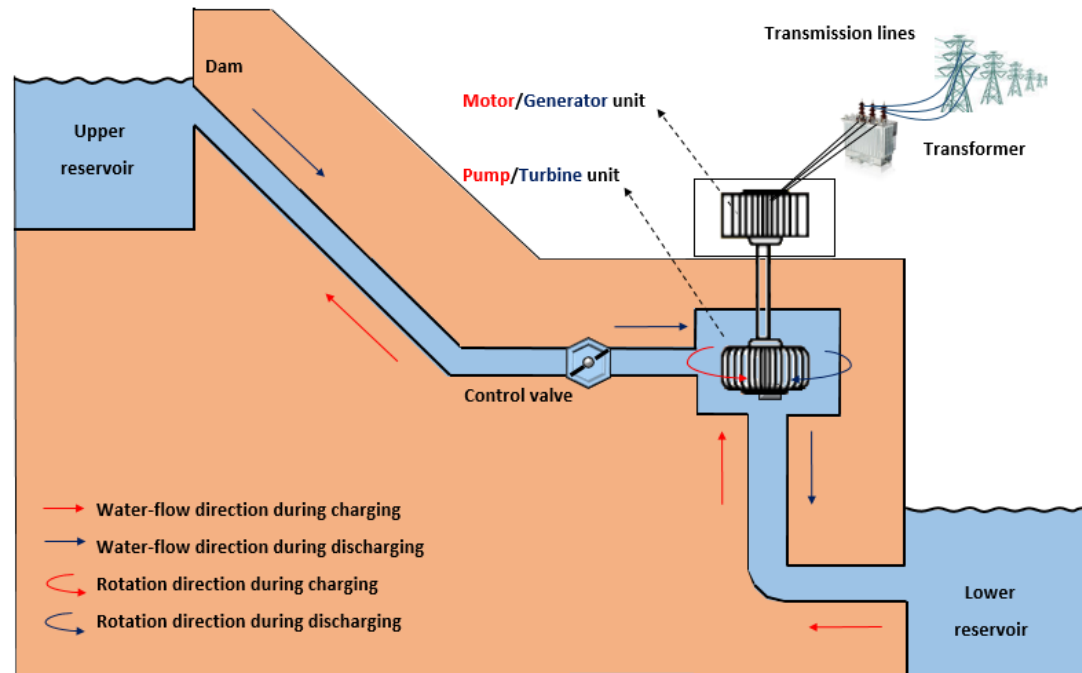
# Αποθήκευση ενέργειας μέσω αντλησιοταμίευσης

- Συνιστώσες συστήματος:
  - Διασυνδεδεμένα έργα αποθήκευσης, σε διαφορετικά υψόμετρα
  - Ενιαίος αγωγός στον οποίο τοποθετείται ειδικός τύπος στροβίλου, που επιτρέπει αντιστρεπτή ροή του νερού (**αντλιοστρόβιλος**) ή δύο παράλληλοι αγωγοί, ο ένας εξοπλισμένος με συμβατικό υδροστρόβιλο και ο άλλος με αντλία.
- Λειτουργία συστήματος:
  - Παραγωγή ενέργειας τις ώρες αιχμής της ζήτησης
  - Άντληση νερού για αποθήκευση ενέργειας, τις ώρες χαμηλής ζήτησης

## Σε παγκόσμια κλίμακα:

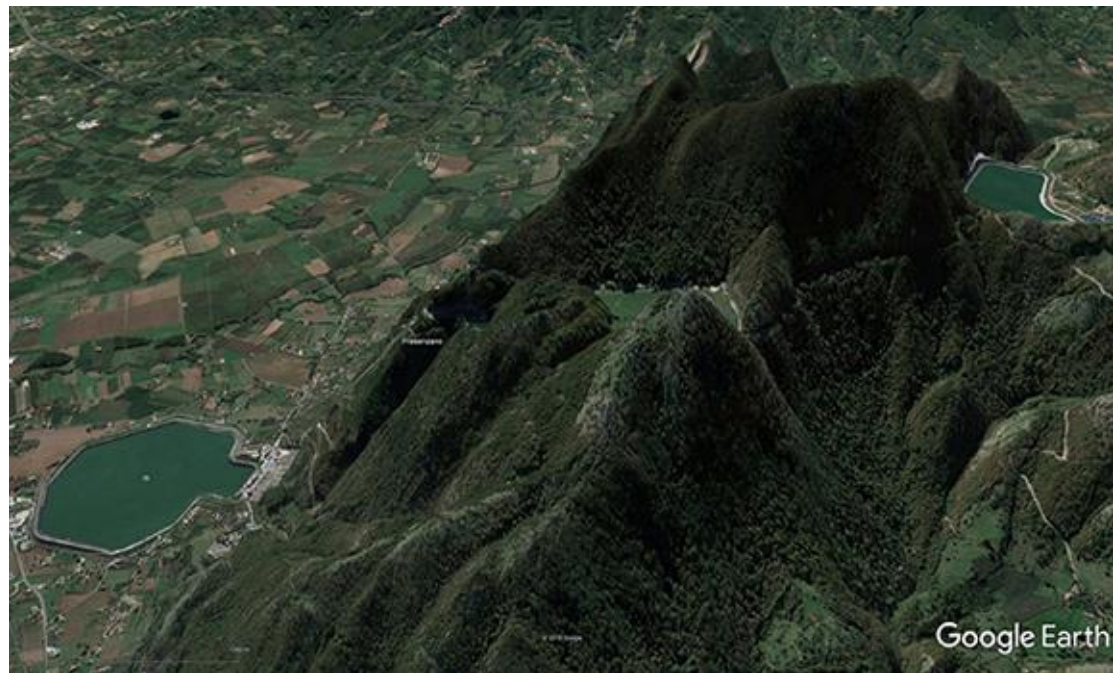
- Αποτελεί το 94% της συνολικής εγκαταστημένης ισχύος σε μέσα αποθήκευσης ενέργειας
- Συνολική ισχύς το 2018: 161 GW
- Αναμένεται να προστεθούν επιπλέον 78 GW έως το 2030
- Πρόσθετη ενέργεια: 9 TWh
- Θεωρητικό δυναμικό: 22 000 TWh

Πηγή: <https://www.hydropower.org/publications/the-world%E2%80%99s-water-battery-pumped-hydropower-storage-and-the-clean-energy-transition>



# Κατηγορίες έργων

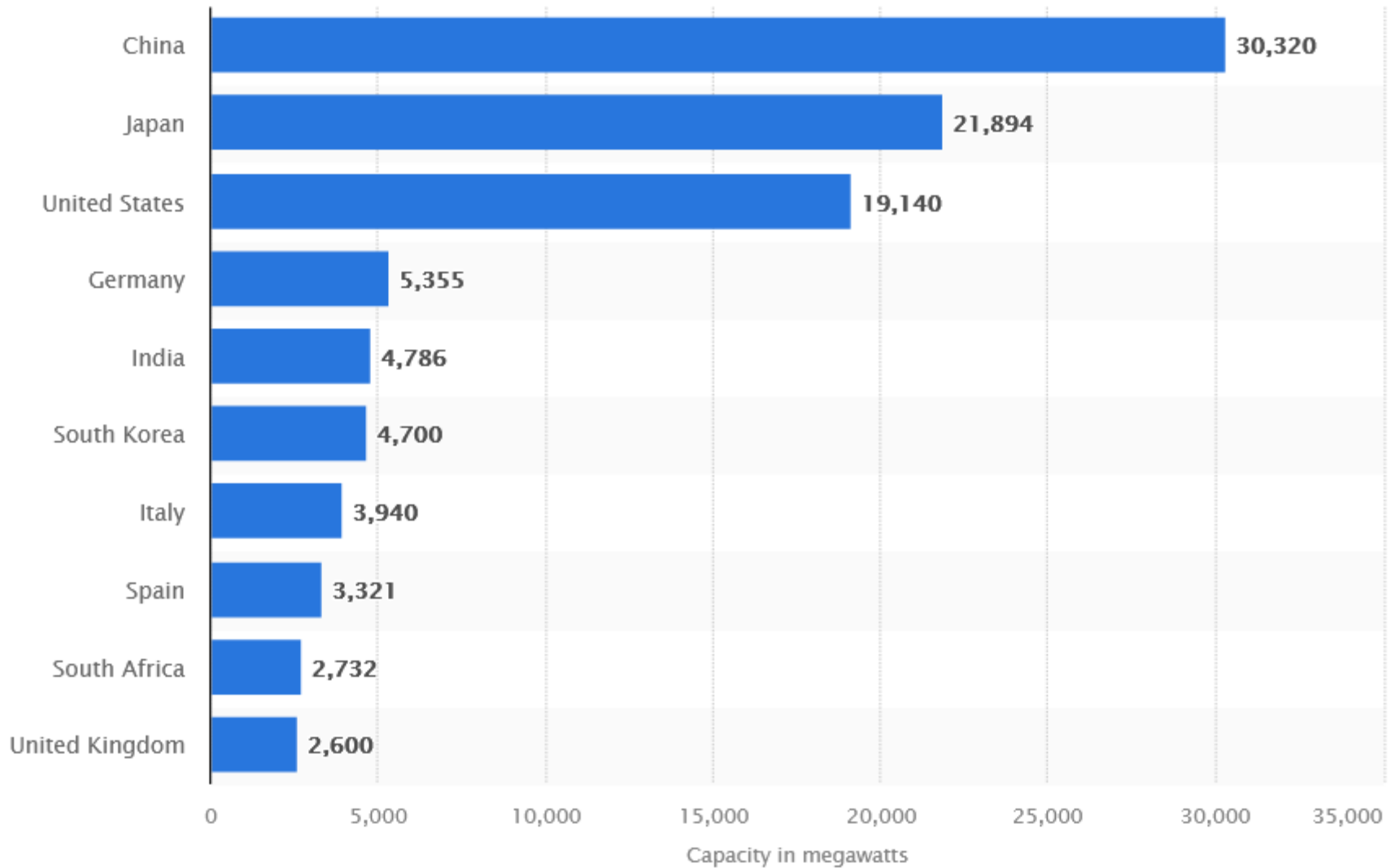
- ❑ **Ανοιχτού κύκλου:** ο χαμηλός ταμιευτήρας είναι εξ ορισμού κατασκευασμένος επί ποταμού
- ❑ **Κλειστού κύκλου:** δύο ανεξάρτητες δεξαμενές ή ταμιευτήρες παρεμφερούς χωρητικότητας, που ανακυκλώνουν νερό μεταξύ των δύο διατάξεων αποθήκευσης



**Prezenzano, Ιταλία:** Δύο ταμιευτήρες ίσης χωρητικότητας  $6.0 \text{ hm}^3$ , εγκατεστημένη ισχύς  $1000 \text{ MW}$ , υψομετρική διαφορά  $495 \text{ m}$  (έναρξη λειτουργίας: 1991)

**Tumut 3:** Το πρώτο έργο αποθήκευσης ενέργειας στην Αυστραλία (1973), εγκατεστημένη ισχύς  $1650 \text{ MW}$ , υψομετρική διαφορά  $150.9 \text{ m}$

# Εγκατεστημένη ισχύς έργων αντλησιοταμίευσης (2020)



Πηγή: IEA, Pumped storage hydropower storage capability by countries, 2020-2026, IEA, Paris <https://www.iea.org/data-and-statistics/charts/pumped-storage-hydropower-storage-capability-by-countries-2020-2026>

# Παράδειγμα: Καζυνογawa (Ιαπωνία)

- ❑ Λειτουργεί από το 2001 στην περιοχή Yamnashi-Ken της Ιαπωνίας, και αποτελείται από δύο ταμιευτήρες χωρητικότητας 19.2 και 18.4 hm<sup>3</sup>, με υψομετρική διαφορά 685 m.
- ❑ Ο σταθμός παραγωγής ενέργειας, ισχύος 1600 MW, βρίσκεται 500 m κάτω από την επιφάνεια του εδάφους και συνδέεται με τον άνω και κάτω ταμιευτήρα με σήραγγες μήκους 5 και 3 km.



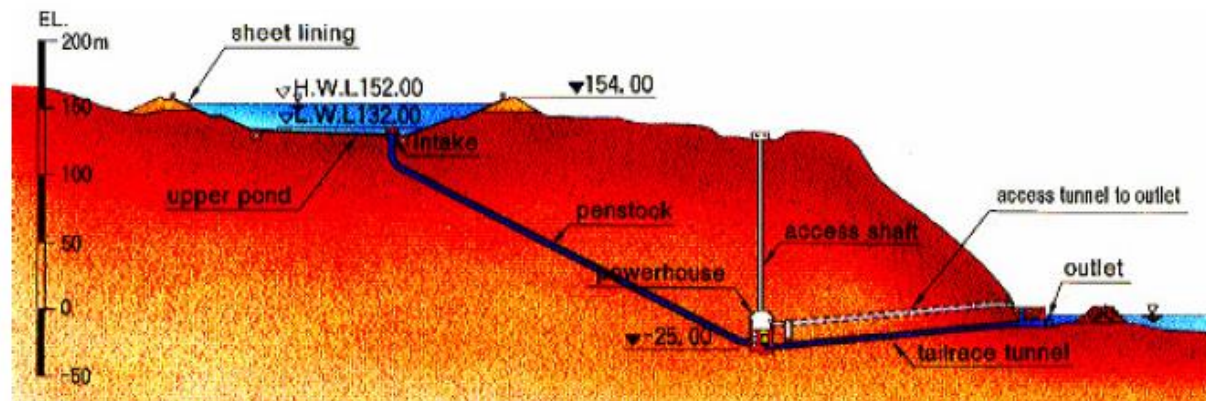
# Παράδειγμα: Geesthacht (Γερμανία)



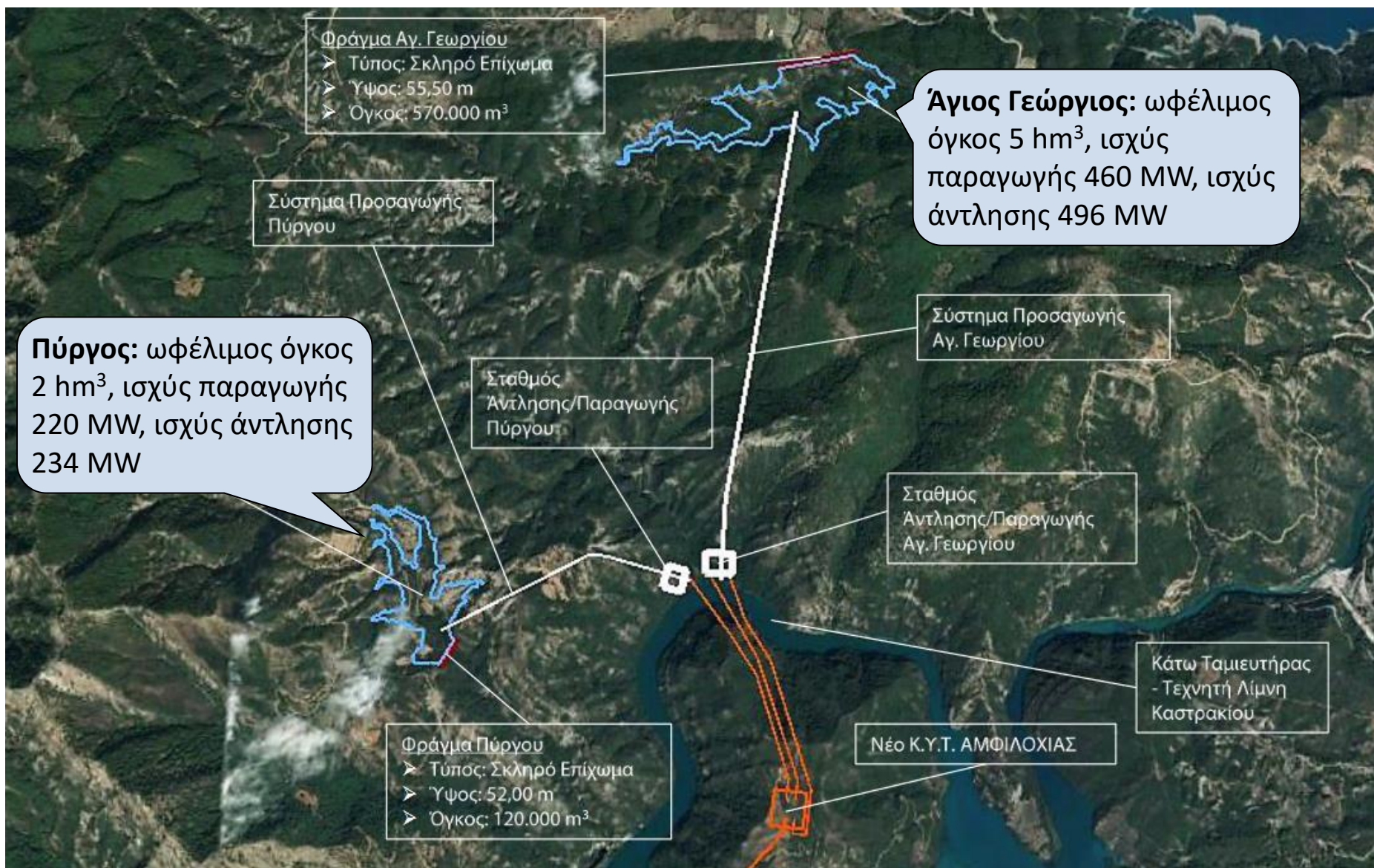
- Έναρξη λειτουργίας: 1958
- Εγκατεστημένη ισχύς:  $3 \times 40$  MW
- Μέσο ύψος πτώσης: 83 m
- Κάτω ταμιευτήρας: φράγμα επί του ποταμού Έλβα,  $8.21 \text{ hm}^3$
- Άνω ταμιευτήρας: λιμνοδεξαμενή, ωφέλιμη χωρητικότητα  $3.3 \text{ hm}^3$
- Ισοδύναμη αποθήκευση: 600 MWh
- Χρόνος αυτονομίας: 4.5 ώρες
- Χρόνος πλήρωσης άνω δεξαμενής μέσω άντλησης: 9 ώρες
- Χρόνος απόκρισης: 90 s

# Παράδειγμα: Okinawa (Ιαπωνία)

- Το πρώτο έργο άντλησης-ταμίευσης στον κόσμο που χρησιμοποιεί **θαλασσινό νερό** (έναρξη λειτουργίας 1999).
- Ισχύς 30 MW, ύψος πτώσης 140 m, μέγιστη παροχή 26 m<sup>3</sup>/s
- Κατά τη λειτουργία του έργου δημιουργήθηκαν σοβαρά προβλήματα εξαιτίας:
  - της διήθησης θαλασσινού νερού από τη δεξαμενή στο έδαφος
  - της προσκόλλησης θαλάσσιων οργανισμών στο εσωτερικό των αγωγών
  - της διάβρωσης των στροβίλων και άλλων μεταλλικών στοιχείων



# Παράδειγμα: Σύστημα αντλησοταμείωσης Αμφιλοχίας με δύο ανεξάρτητες δεξαμενές (Αγ. Γεώργιος & Πύργος)



# Βασικά μεγέθη άντλησης

- Για να ανυψωθεί μια ποσότητα νερού  $V$  κατά μια υψομετρική διαφορά  $\Delta z$ , με χρήση αντλιών, απαιτείται κατανάλωση ενέργειας:

$$E = \gamma V H_M / \eta$$

όπου  $H_M$  το λεγόμενο **μανομετρικό ύψος** και  $\eta$  ο **βαθμός απόδοσης** των αντλιών.

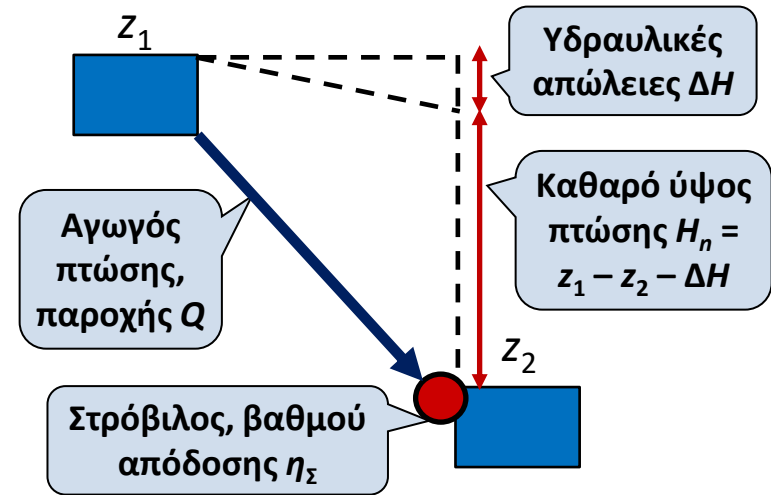
- Το μανομετρικό ύψος εκφράζει την **υδραυλική ενέργεια** που απαιτείται προκειμένου να καλυφθεί η υψομετρική διαφορά,  $\Delta z$ , και οι υδραυλικές απώλειες,  $\Delta H$ , κατά τη μεταφορά του νερού (απώλειες ενέργειας στον λεγόμενο **καταθλιπτικό αγωγό**):

$$H_M = \Delta z + \Delta H$$

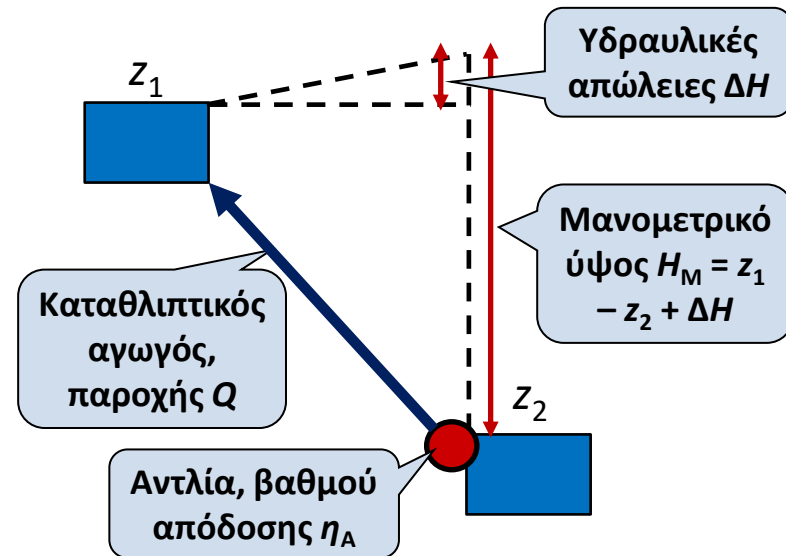
- Ο βαθμός απόδοσης είναι ο λόγος της **μηχανικής ενέργειας** που παρέχει η αντλία προς την ηλεκτρική ενέργεια που της παρέχεται.
- Η απαιτούμενη **ισχύς** της αντλίας ισούται με:

$$P = \gamma Q H_M / \eta$$

όπου  $Q$  η διερχόμενη παροχή.



Παραγόμενη ισχύς:  $P = \eta_z \gamma Q (\Delta z - \Delta H)$



Καταναλισκόμενη ισχύς:  $P = \gamma Q (\Delta z + \Delta H) / \eta_A$

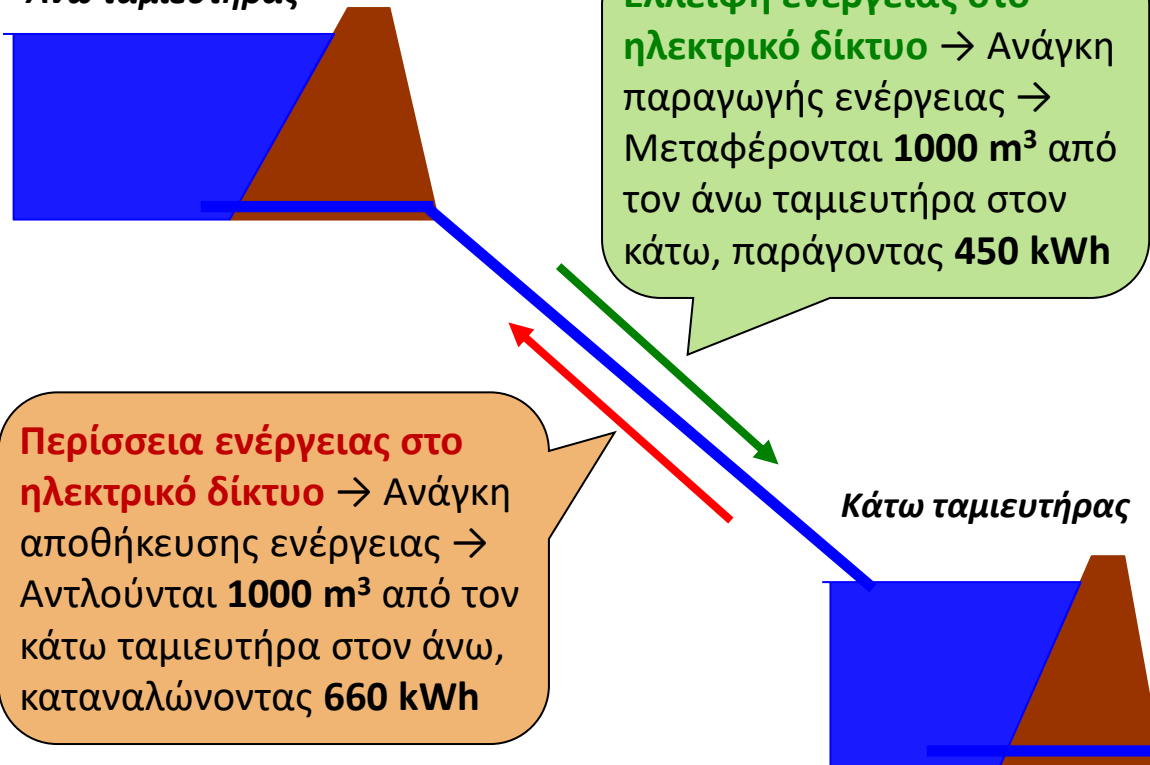


# Αριθμητική εφαρμογή

## Δεδομένα & παραδοχές:

- Δύο ταμιευτήρες με διάταξη αντλησιοταμίευσης, σε υψομετρική διαφορά 200 m
- Μεταφορά όγκου νερού  $1000 \text{ m}^3$  από τον άνω στον κάτω ταμιευτήρα και αντίστροφα
- Καθαρό ύψος πτώσης 195 m (5 m απώλειες ενέργειας στον αγωγό για μεταφορά  $1000 \text{ m}^3$ )
- Μανομετρικό ύψος 205 m (μεταφέρεται η ίδια ποσότητα νερού στον ίδιο αγωγό, ανάστροφα)
- Βαθμός απόδοσης 0.85 (κατά προσέγγιση κοινός για την άντληση και την παραγωγή)

Άνω ταμιευτήρας



Τα συστήματα αντλησιοταμίευσης **αποθηκεύουν την περίσσεια ενέργειας**, χάνοντας ποσοστό της τάξης του 30%.

Λαμβάνοντας υπόψη ότι η τιμή της ενέργειας είναι μισή στις περιόδους που υπάρχει περίσσεια (π.χ. νύχτα), προκύπτει **οικονομικό όφελος** από την όλη διαδικασία.

Η αντλησιοταμίευση είναι η μοναδική τεχνική αποθήκευσης ενέργειας στη **μεγάλη κλίμακα**.

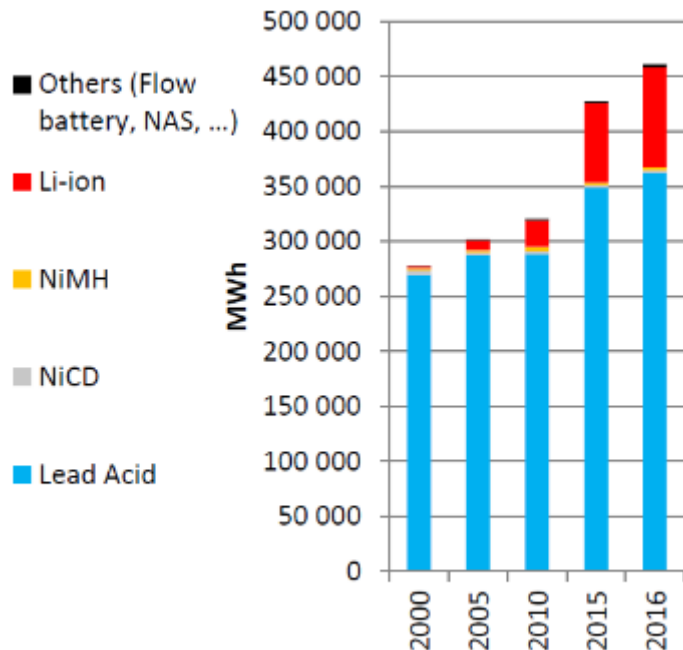
# Χαρακτηριστικά μεγέθη μπαταριών (1)

---

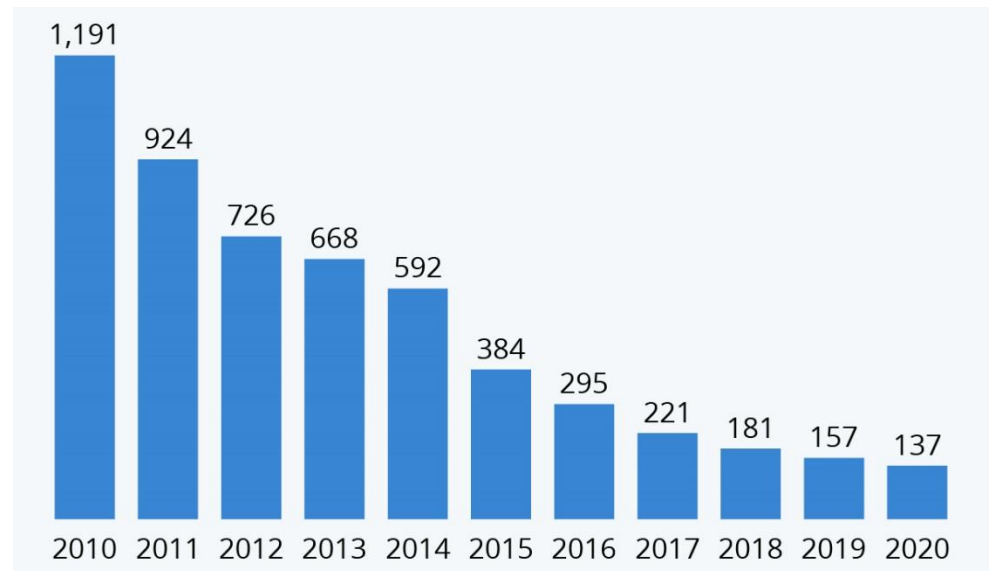
- ❑ **Φόρτιση/εκφόρτιση:** Διαδικασίες μετατροπής ηλεκτρικής ενέργειας σε χημική (φόρτιση) ή της χημικής σε ηλεκτρική (εκφόρτιση) κατά το πέρασμα συνεχούς ρεύματος
- ❑ **Χωρητικότητα:** Ποσότητα φορτίου (σε αμπερώρια,  $1 \text{ Ah} = 1 \text{ Coulomb/s}$ ) που μπορεί να παρέχει μια μπαταρία κατά τη διάρκεια μιας εκφόρτισης (συμβολίζεται με C)
- ❑ **Ονομαστική χωρητικότητα:** Ποσότητα φορτίου που μπορεί θεωρητικά να αντληθεί σε δεδομένο χρονικό διάστημα (συνήθως 10 h (C10) ή 20 h (C20)) υπό θερμοκρασία  $20^\circ\text{C}$
- ❑ **Βάθος εκφόρτισης:** Λόγος αντλούμενου φορτίου προς ονομαστική χωρητικότητα
- ❑ **Μέγιστο βάθος εκφόρτισης:** Η μέγιστη τιμή βάθους εκφόρτισης που μπορεί να λειτουργήσει ένας συσσωρευτής χωρίς να προκληθεί βλάβη σ' αυτόν
- ❑ **Στάθμη φόρτισης (SOC):** Χωρητικότητα που μπορεί να εκφορτιστεί από μια μπαταρία σε μια συγκεκριμένη στιγμή
- ❑ **Ενεργός αξιοποιήσιμη χωρητικότητα:** Γινόμενο ονομαστικής χωρητικότητας και μέγιστου βάθους εκφόρτισης
- ❑ **Ρυθμός εκφόρτισης/φόρτισης:** Ρεύμα στο οποίο φορτίζονται/εκφορτίζονται οι μπαταρίες για συγκεκριμένο αριθμό ωρών (π.χ., C/5 για 5 ώρες, C/20 για 20 ώρες, κλπ)
- ❑ **Απόδοση:** Λόγος των Ah που εκφορτίζονται από τη μπαταρία προς τις Ah που φορτίζονται στην μπαταρία σε μια συγκεκριμένη χρονική περίοδο
- ❑ **Κύκλος:** Η επαναλαμβανόμενη διαδικασία εκφόρτισης και φόρτισης που συμβαίνει σε μια μπαταρία εν λειτουργία

## Χαρακτηριστικά μεγέθη μπαταριών (2)

- **Κύκλος ζωής:** Αριθμός κύκλων που μπορεί να δώσει μια μπαταρία κατά τη διάρκεια της ωφέλιμης ζωής της – αντιστοιχεί συνήθως στον αριθμό των κύκλων εκφόρτισης για ένα συγκεκριμένο βάθος που η μπαταρία μπορεί να πραγματοποιήσει πριν η χωρητικότητά της μειωθεί σε συγκεκριμένο ποσοστό (συνήθως 80%) της αρχικής της τιμής
- **Αυτοεκφόρτιση:** Απώλεια φορτίου μπαταρίας αν αυτή αφεθεί σε κατάσταση ανοικτού κυκλώματος για υπολογίσιμο χρονικό διάστημα (τυπικές τιμές: 1-4% ανά μήνα σε θερμοκρασία 20-25°C)



### Κόστος μπαταριών λιθίου-ιόντων (Li-ion) σε \$/kWh

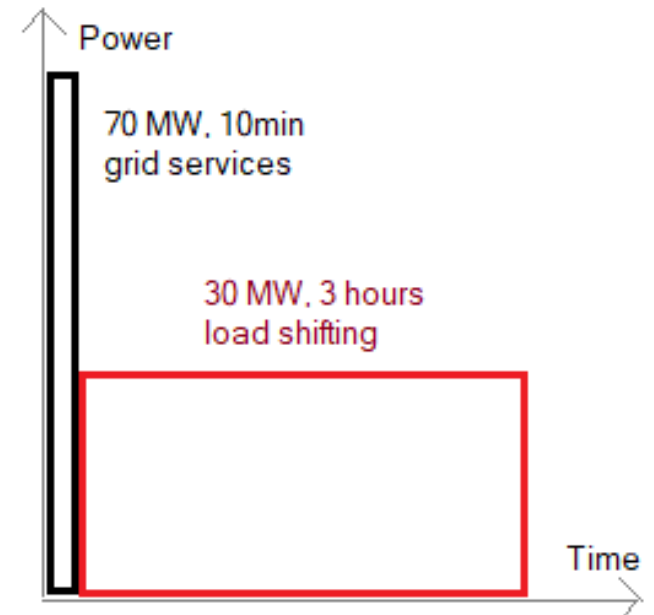


Πηγή: Battery storage to drive the power system transition (<https://ec.europa.eu/energy/>)

Πηγή: <https://www.statista.com/chart/23807/lithium-ion-battery-prices/>

# Παράδειγμα: Hornsdale Power Reserve (Αυστραλία)

- Το 2017 τέθηκε σε λειτουργία η μεγαλύτερη μπαταρία ιόντων λιθίου της Tesla, που τοποθετήθηκε στο αιολικό πάρκο στο Hornsdale στη Νότια Αυστραλία.
- Ονομαστική ισχύς 100 MW, μέγιστη αποθήκευση ενέργειας 129 MWh
- Κόστος: 90 εκατομμύρια Α\$
- Χρόνος κατασκευής < 100 ημέρες
- 70 MW × 10 λεπτά για σταθεροποίηση δικτύου έναντι δυσμενών καιρικών φαινομένων (αφού η κατασκευή εφεδρικών μονάδων Φ/Α κρίθηκε οικονομικά ασύμφορη)
- 30 MW × 3 ώρες για διαχείριση φορτίων από ΑΠΕ
- Επέκταση 2020: + 50 MW, +64.5 MWh



# Υβριδικό ενεργειακό έργο Ικαρίας

Το καλοκαίρι, η ζήτηση ηλεκτρικής ενέργειας αυξάνει την ημέρα. Η απαιτούμενη ισχύς είναι 4 MW τον χειμώνα και 10 MW το καλοκαίρι.

Το καλοκαίρι το νερό του ταμιευτήρα Πέζι διατίθεται κυρίως για ύδρευση και άρδευση

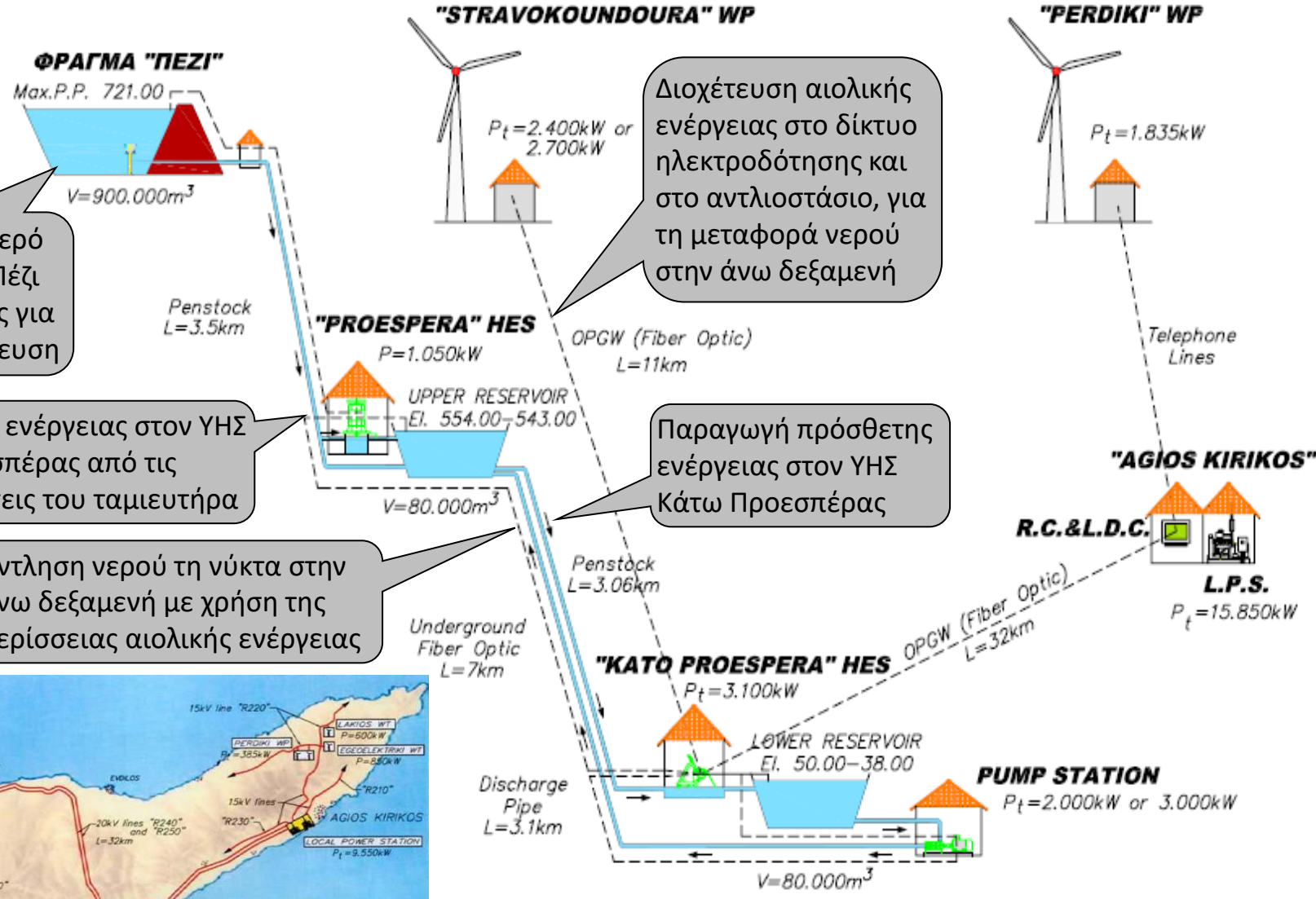
Παραγωγή ενέργειας στον ΥΗΣ Άνω Προεσπέρας από τις υπερχειλίσεις του ταμιευτήρα

Άντληση νερού τη νύκτα στην άνω δεξαμενή με χρήση της περίσσειας αιολικής ενέργειας

Διοχέτευση αιολικής ενέργειας στο δίκτυο ηλεκτροδότησης και στο αντλιοστάσιο, για τη μεταφορά νερού στην άνω δεξαμενή

Παραγωγή πρόσθετης ενέργειας στον ΥΗΣ Κάτω Προεσπέρας

Το έργο έχει κοστίσει **23 Μ€** και αναμένεται να έχει ετήσια καθαρή απόδοση ηλεκτρικής ενέργειας **11 GWh**



# Υβριδικό “Green energy project” Tent Mountain

